

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
12 août 2004 (12.08.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2004/067611 A1

- (51) Classification internationale des brevets⁷ : **C08J 5/22, C08L 101/12, H01M 8/10**
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2004/050025
- (22) Date de dépôt international :
22 janvier 2004 (22.01.2004)
- (25) Langue de dépôt :
français
- (26) Langue de publication :
français
- (30) Données relatives à la priorité :
03/00726 23 janvier 2003 (23.01.2003) FR
- (71) Déposant (*pour tous les États désignés sauf US*) : **COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR]; 31-33 rue de la Fédération, F-75752 Paris 15ème (FR).**
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) : **VALLE, Karine [FR/FR]; 59 rue Orivet, F-37000 Tours (FR). BELLEVILLE, Philippe [FR/FR]; 25 rue Charles Gilles, F-37000 Tours (FR). SANCHEZ, Clément [FR/FR]; 9 résidence du château de Courcelles, F-91100 Gif Sur Yvette (FR).**
- (74) Mandataire : **AUDIER, Philippe; c/o BREVATOMBE, 3, rue du Docteur Lancereaux, F-75008 Paris (FR).**
- (81) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible*) : **AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.**
- (84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : **ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).**

Publiée :

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(54) Title: ORGANIC-INORGANIC HYBRID MATERIAL CONTAINING A MINERAL MESOPOROUS PHASE AND AN ORGANIC PHASE, A MEMBRANE AND FUEL CELL

(54) Titre : MATERIAU HYBRIDE ORGANIQUE-INORGANIQUE COMPRENANT UNE PHASE MINERALE MESOPOREUSE ET UNE PHASE ORGANIQUE, MEMBRANE ET PILE A COMBUSTIBLE

(57) Abstract: The inventive organic-inorganic hybrid material comprises two phases: a first mineral phase containing a mesoporous structures open porosity array and a second organic phase containing an organic polymer. The inventive membrane and electrode contain said material. The inventive fuel cell comprises at least one said membrane and/or at least one said electrode. A method for producing said material is also disclosed.

(57) Abrégé : Matériau hybride organique-inorganique comprenant deux phases : une première phase minérale comprenant un réseau mésoporeux structuré à porosité ouverte ; et une deuxième phase organique comprenant un polymère organique. Membrane et électrode comprenant ce matériau. Pile à combustible comprenant au moins une telle membrane et/ou au moins une telle électrode. Procédé de préparation dudit matériau hybride.

WO 2004/067611 A1

MATERIAU HYBRIDE ORGANIQUE-INORGANIQUE
COMPRENANT UNE PHASE MINERALE MESOPOREUSE
ET UNE PHASE ORGANIQUE,
MEMBRANE ET PILE A COMBUSTIBLE

5

DESCRIPTION

La présente invention concerne un matériau hybride organique-inorganique comprenant une phase minérale mésoporeuse et une phase organique.
10

L'invention concerne, en outre, une membrane et une électrode comprenant ce matériau.

L'invention a trait également à une pile à combustible comprenant au moins une telle membrane et/ou au moins une telle électrode.
15

L'invention est relative enfin à un procédé de préparation du matériau hybride organique-inorganique.

Le domaine technique de l'invention peut être défini, de manière générale, comme celui des matériaux poreux et plus particulièrement des matériaux dits mésoporeux.
20

Plus précisément, l'invention se situe dans le domaine des matériaux mésoporeux destiné à des utilisations en électrochimie, en particulier dans les piles à combustibles, telles que les « PEMFC » (« Polymeric Electrolyte Membrane Fuel Cell », en anglais).
25

On sait qu'un des éléments essentiels des piles à combustible, par exemple celles utilisées dans le secteur de l'automobile et de la téléphonie portable est la membrane échangeuse protonique.
30

Ces membranes structurent le cœur de la pile à combustible et doivent par conséquent présenter de bonnes performances en conduction protonique, ainsi qu'une faible perméabilité aux gaz réactants (H_2/O_2).

5 Les propriétés des matériaux qui constituent les électrolytes solides polymériques formant ces membranes et qui doivent résister à des milliers d'heures de fonctionnement de la pile, sont essentiellement la stabilité chimique, et la résistance à l'hydrolyse et à
10 l'oxydation, notamment la résistance hydrothermale, et une certaine flexibilité mécanique.

Les membranes préparées à partir d'ionomères perfluorés, particulièrement le Nafion®, remplissent ces exigences pour des températures de fonctionnement
15 inférieures à 90°C.

Cette température est cependant insuffisante pour permettre l'intégration des piles à combustible comprenant de telles membranes dans un véhicule. Cette intégration suppose en effet l'augmentation de la température de fonctionnement vers 100-150°C dans le but d'accroître le rendement de conversion courant/énergie et donc l'efficacité de la pile, mais également d'améliorer le contrôle de la gestion thermique en diminuant le volume du radiateur.

25 Par ailleurs, l'efficacité conductrice des membranes protoniques est fortement liée à la présence d'eau dans le milieu. Or à des températures supérieures à 100°C, l'eau est rapidement évacuée de la membrane, la conductivité chute et la perméabilité au combustible
30 s'accroît. A ces températures, cette diminution des performances peut s'accompagner d'une dégradation de la

membrane. Pour résoudre les problèmes de dessèchement des membranes dans les piles à combustibles à haute température, à savoir au moins égale à 100°C, le maintien d'une humidité relative maximale 80-100% est nécessaire mais difficilement réalisable par une source externe.

Par contre, il est connu que l'insertion ou la croissance d'une charge hygroscopique « *in situ* » favorise la rétention d'eau à l'intérieur du polymère, 10 retarde ce processus de déshydratation du milieu protonique et assure ainsi la conduction des protons. Outre son caractère hydrophile cette charge fonctionnelle peut posséder intrinsèquement des propriétés conductrices et ainsi accroître les 15 performances de la membrane.

Afin d'augmenter la rétention d'eau des membranes dans les piles à combustibles à haute température, de nombreuses membranes composites ont été développées, notamment par croissance de nanoparticules 20 inorganiques hydrophiles. Ces nano-charges minérales peuvent être synthétisées par voie sol-gel dans des matrices organiques sulfonées perfluorées, mais aussi dans des matrices constituées de composés polyaromatiques, ou de polyéthers. Ces membranes sont 25 nommées présentement membranes hybrides organiques-inorganiques.

Les particules minérales peuvent être :

- conductrices, elles sont alors de type acide comme par exemple l'acide tungstophosphorique, ou 30 tungstosilicique, ou antimonique, ou de type phosphates

et phosphonates métalliques comme le phosphate de zirconium [1-7] ;

- non conductrices et simplement hydrophiles comme les oxydes de métaux et de métalloïdes TiO_2 , SiO_2 ...[8-19].

Outre l'amélioration de la gestion de l'eau à haute température, la diminution de la perméabilité de la membrane aux combustibles est démontrée dans ces membranes hybrides organiques-inorganiques par rapport aux membranes classiques de type Nafion® par exemple. La stabilité thermique et chimique reste toutefois limitée car inhérente à la matrice polymère organique sulfoné utilisée.

Les travaux présentés récemment par Rozière et al. [19] ont trait à la fonctionnalisation du réseau silicate par un groupement amine qui améliore l'interaction entre la phase inorganique et le polymère organique via des liaisons iono-covalentes.

Les recherches menées par Honma et al. [20-21] et Park et al. [22] sur la croissance de matrices hybrides organiques-inorganiques continues par dispersion d'hétéropolyacides respectivement dans des copolymères poly(isocyanopropyl)silsesquioxanes-polymère organique (PEG, PPO, PTMO) ou dans des cocondensats de glycidyloxypropyltriméthoxysilane (GLYMO) et de tétraéthoxysilane ouvrent de nouvelles perspectives d'utilisation de chaînes polymères thermostables.

Même si les hétéropolyacides minéraux restent très attractifs par leur conductivité intrinsèque, leur incorporation à des taux de charges importants (30 à

70% en masse) dans des polymères peu ou non conducteurs pose généralement des problèmes d'élution progressive et conséquente lors du fonctionnement de la pile du fait de leur solubilité dans l'eau.

5 Parallèlement aux matériaux composites ou hybrides organiques-inorganiques, décrits plus haut, les matériaux mésoporeux initialement imaginés pour la catalyse, c'est-à-dire essentiellement la silice et les aluminosilicates, ont commencé à susciter l'attention
10 de certains électrochimistes.

Rappelons que les matériaux dits mésoporeux, sont des solides qui présentent au sein de leur structure des pores possédant une taille comprise typiquement entre 2 et 80 nm, qui est intermédiaire
15 entre celle des micropores et celle des macropores.

Typiquement, les matériaux mésoporeux sont des oxydes métalliques amorphes ou cristallins dans lesquels les pores sont généralement répartis de manière aléatoire avec une distribution très large de
20 la taille des pores.

Les matériaux mésoporeux structurés, dénommés matériaux « mésostructurés », correspondent quant à eux à des réseaux poreux structurés qui présentent un agencement spatial organisé de mésopores. Cette
25 périodicité spatiale des pores est caractérisée par l'apparition d'au moins un pic à bas angle dans un diagramme de diffusion des rayons X ; ce pic est associé à une distance de répétition qui est généralement comprise entre 2 et 50 nm. La
30 mésostructure est vérifiée par microscopie électronique en transmission.

Dans ce cadre, le procédé sol-gel offre des stratégies innovantes dans la construction de ces édifices mésoporeux organisés, notamment par polymérisation inorganique au sein de systèmes moléculaires organisés (SMO) de tensioactifs ou au sein de systèmes polymériques organisés (SPO) de copolymères à blocs.

En présence d'agents texturants de type SMO, cette chimie douce permet également de synthétiser, à partir de précurseurs inorganiques et organométalliques, de tels réseaux mésostructurés à nature organominérale appelés matériaux hybrides organiques-inorganiques. Les propriétés de ces matériaux hybrides organiques-inorganiques mésoporeux dépendent non seulement de la nature chimique des composantes organique et inorganique, mais également de la synergie qui peut apparaître entre ces deux chimies.

C'est la raison pour laquelle ces matériaux sont souvent dénommés matériaux « multifonctionnels ».

Le degré d'organisation est gouverné par la nature de ces deux entités organique et inorganique mais aussi par l'agencement multiéchelle de cet arrangement. Ainsi, l'intégration dans une structure mésoporeuse ordonnée, dans les « murs » comme dans les pores, de fonctionnalités chimiques capables d'induire des propriétés spécifiques présente un grand intérêt dans diverses applications (catalyse, filtration, électrochimie...) [34].

Colomer et al. [23-24] ont préparé des silices mésoporeuses non organisées par co-agrégation de nanoparticules de silice de différentes tailles ou

par croissance contrôlée (pH) de silice colloïdale. Ils ont étudié l'impact de telles porosités sur la conductivité protonique en milieu acide de ces silices pour les PEMFCs. Le traitement thermique élevé vers 5 500-700°C qui est nécessaire à la génération de la porosité et la consolidation de la silice mésoporeuse limite néanmoins cette technique à des réseaux purement inorganiques.

A contrario, la structuration de la silice 10 mésoporeuse synthétisée par l'utilisation de surfactants ne nécessite pas de traitement thermique élevé et autorise ainsi une fonctionnalisation organique lors de la croissance du réseau [25]. De plus, la structure de ces matériaux est souvent bien 15 définie. Cette organisation, liée à la grande surface spécifique, joue un rôle important pour améliorer la conduction des protons au travers du réseau hydrophile. Minami et al. [26-28] ont imprégné ce type de silice par de l'acide sulfurique ou phosphorique en étudiant 20 l'influence de la taille des pores et de la surface spécifique sur la conductivité et la porosité. Les propriétés atteintes en terme de conductivité sont très intéressantes de l'ordre de $2\text{-}3.10^{-1}$ S/cm.

Par ailleurs, différentes silices hybrides 25 organiques-inorganiques mésostructurées possédant une fonctionnalité SO_3H [29-31] ou PO_3H_2 [32] dans les pores offrent un potentiel intéressant pour les piles à combustibles bien qu'essentiellement développées pour 30 des applications catalytiques. Kaliaguine et al. [33] qui travaillent dans le domaine électrochimique ont effectué des mesures de conductivité et d'adsorption

d'eau dans ce type de composés. Ces silices présentent dans l'ensemble un caractère hydrophile prononcé et les mesures de conductivité sont intéressantes pour des systèmes non optimisés, elles sont de l'ordre de 10^{-2} S/cm à 80°C sous 100% d'humidité relative.

Les récentes références bibliographiques ci-dessus concernant l'éventuelle utilisation dans les dispositifs électrochimiques des matériaux mésoporeux, tels que les silices mésoporeuses mésostructurées construites par SMO et SPO ne peuvent donner lieu à une application directe en pile à combustibles. En effet, il est impossible de mettre les matériaux tels que décrits et mentionnés dans ces documents sous la forme de membranes.

Il existe donc un besoin pour un matériau mésoporeux qui puisse être mis sous la forme d'une membrane, en particulier d'une membrane homogène et flexible.

Il existe encore un besoin pour un matériau mésoporeux qui soit thermiquement et chimiquement stable et résistant à l'hydrolyse et à l'oxydation.

Il existe ensuite un besoin pour un tel matériau mésoporeux pouvant en outre être pourvu d'une conductivité, en particulier d'une conductivité ionique, de préférence protonique, élevée, et pouvant ainsi être mis en œuvre sous forme de membrane dans des dispositifs électrochimiques, tels que des piles à combustible à des températures de fonctionnement élevées, par exemple voisines de 100 à 150°C.

Ce matériau, dans le cadre d'une telle utilisation, doit permettre au contraire des membranes

de l'art antérieur, par exemple à base d'ionomères perfluorés, une rétention d'eau élevée, même à haute température afin d'éviter le dessèchement de la membrane, et doit posséder une conductivité élevée et 5 une faible perméabilité au combustible à haute température, associée à une absence de dégradation de la membrane.

Le but de la présente invention est de fournir un matériau hybride organique-inorganique 10 mésoporeux qui réponde à l'ensemble des besoins indiqués ci-dessus.

Le but de la présente invention est encore de fournir un matériau mésoporeux qui ne présente pas les inconvenients, défauts et désavantages des matériaux de 15 l'art antérieur et qui, s'il est muni de fonctions conductrices, puisse être utilisé dans un dispositif électrochimique, tel qu'une pile à combustible, en présentant d'excellentes performances.

Ce but et d'autres encore sont atteints, 20 conformément à l'invention par un matériau hybride organique-inorganique comprenant deux phases :

- une première phase minérale comprenant un réseau mésoporeux structuré à porosité ouverte ; et
- une deuxième phase organique comprenant un 25 polymère organique, ladite phase organique n'étant essentiellement pas présente à l'intérieur des pores du réseau mésoporeux structuré.

La structure spécifique du matériau hybride organique-inorganique selon l'invention qui comprend 30 une phase minérale mésoporeuse et une phase organique n'a jamais été décrite dans l'art antérieur où il n'est

pas fait état de la croissance de réseaux minéraux mésoporeux, en particulier conducteurs et/ou hydrophiles, dans une matrice comprenant un polymère organique mécaniquement structurant.

5 Notamment, compte tenu de leur grande surface spécifique et de leur structure particulière, l'utilisation des matériaux hybrides organiques-inorganiques mésoporeux selon l'invention dans les membranes conductrices protoniques offre de nombreuses 10 possibilités favorisant la continuité des chemins de conduction à condition d'avoir une porosité ouverte. On entend par porosité ouverte, une porosité formée de pores débouchants et restant accessibles aux espèces conductrices.

15 Selon une première forme de réalisation du matériau de l'invention, la phase minérale et la phase organique sont continues et entremêlées.

Selon une deuxième forme de réalisation, la 20 phase minérale est discontinue, et dispersée dans la phase organique qui est continue.

La phase minérale peut présenter des fonctions conductrices et/ou hydrophiles sur les surfaces de ses pores.

De même, la phase organique peut présenter 25 des fonctions conductrices et/ou hydrophiles.

Le matériau peut éventuellement comprendre en outre une troisième phase à l'intérieur des pores constituée par au moins un agent tensioactif.

Cet agent tensioactif peut présenter 30 éventuellement des fonctions conductrices et/ou hydrophiles, mais seulement dans le cas où au moins une

des autres phases présente des fonctions conductrices et/ou hydrophiles.

Par fonctions conductrices, on entend généralement que ces fonctions présentent une 5 conductivité ionique, de préférence protonique.

Si l'on souhaite disposer d'un matériau conducteur, et dans le cas où celui présente trois phases (organique, minérale, tensioactive), au moins une des phases choisie parmi la phase minérale et la 10 phase organique devra présenter des fonctions conductrices, il est aussi possible que deux quelconques des trois phases présentent des fonctions conductrices, ou que les trois phases présentent des fonctions conductrices.

En général, le matériau selon l'invention 15 présente une porosité ouverte servant de réseau de conduction protonique continu. De préférence, le squelette mésoporeux est hygroscopique et possède une fonctionnalité conductrice dans ses pores (il s'agit 20 par exemple d'un oxyde métallique fonctionnalisé) qui assure ainsi le transport des protons et l'hydratation. La phase polymère organique sert de support et apporte principalement la structuration du milieu de conduction.

Il se produit une véritable synergie entre 25 les deux phases qui communiquent au matériau selon l'invention une combinaison unique de propriétés physiques, électriques, mécaniques jamais atteintes dans l'art antérieur.

Les fonctions conductrices peuvent être choisies parmi les groupes échangeurs de cations et/ou les groupes échangeurs d'anions.

Les groupes échangeurs de cations peuvent 5 être choisis, par exemple, parmi les groupes suivants : -SO₃M ; -PO₃M₂ ; -COOM et -B(OM)₂, où M représente l'hydrogène, un cation métallique monovalent, ou ⁺NR¹₄ où chaque R¹ représente indépendamment un hydrogène, un radical alkyle ou un radical aryle.

10 Les groupes échangeurs d'anions peuvent être choisis par exemple parmi les groupes suivants : pyridyle ; imidazolyle ; pyrazolyle ; triazolyle ; les radicaux de formule ⁺NR²₃X⁻, où X représente un anion comme par exemple F, Cl, Br, I, 15 NO₃, SO₄H, ou OR, R étant un radical alkyle ou un radical aryle et où chaque R² représente indépendamment un hydrogène, un radical alkyle, ou un radical aryle ; et les radicaux basiques aromatiques ou non aromatiques contenant au moins un radical choisi parmi les radicaux 20 imidazole, vinylimidazole, pyrrazole, oxazole, carbazole, indole, isoindole, dihydrooxazole, isooxazole, thiazole, benzothiazole, isothiazole, benzoimidazole, indazole, 4,5-dihydropyrazole, 1,2,3-oxadiazole, furazane, 1,2,3-thiadiazole, 25 1,2,4-thiadiazole, 1,2,3-benzotriazole, 1,2,4-triazole, tetrazole, pyrrole, aniline, pyrrolidine, et pyrazole.

La phase minérale est généralement constituée par au moins un oxyde choisi parmi les oxydes de métaux, les oxydes de métalloïdes et les oxydes mixtes 30 de ceux-ci.

Ledit oxyde est généralement choisi parmi les oxydes de silicium, titane, zirconium, hafnium, aluminium, tantale, étain, terres rares ou lanthanides tels que europium, cérium, lanthane ou gadolinium, et 5 les oxydes mixtes de ceux-ci.

La phase minérale du matériau selon l'invention est une phase mésostructurée, cela signifie, de manière plus précise, que le réseau mésoporeux présente une structure organisée avec un 10 motif de répétition.

Par exemple, le réseau mésoporeux peut présenter une structure cubique, hexagonale, lamellaire, vermiculaire, vésiculaire ou bicontinue.

La taille des pores du réseau mésoporeux est 15 généralement de 1 à 100 nm, de préférence de 1 à 50 nm.

Le polymère organique de la phase organique doit généralement répondre à un certain nombre de conditions.

Avant tout ledit polymère doit généralement 20 être thermostable ; par thermostable, on entend qu'il garde ses propriétés sous l'action de la chaleur.

Le polymère doit généralement, en outre, ne pas être sensible à l'hydrolyse et à l'oxydation à des températures en particulier élevées, notamment aux 25 températures de fonctionnement des piles à combustible et ce pendant plusieurs milliers d'heures.

En outre, généralement le polymère choisi doit être :

- soluble en milieu hydroalcoolique, 30 alcoolique ou dans les autres solvants miscibles à l'eau puisque l'organisation du surfactant éventuel en

milieu liquide, agent texturant de la phase mésoporeuse, s'effectue dans des milieux fortement polaires tels que l'eau ;

- plastique, pour apporter suffisamment de tenue à la phase inorganique mésoporeuse et former un film autosupporté, c'est-à-dire que le polymère peut être qualifié de polymère (mécaniquement) structurant ;

- ce polymère ne doit pas essentiellement jouer le rôle d'agent texturant capable de générer une mésoporosité.

Le polymère organique sera généralement choisi parmi les polyéthercétones (PEK, PEEK, PEEKK) ; les polysulfones (PSU), par exemple le Udel® ; les polyéthersulfones, par exemple le VITREX® ; les polyphényléthersulfones (PPSU), par exemple le Radel® ; les copolymères styrène/éthylène (SES), styrène/butadiène (SBS), styrène/isoprène (SIS), par exemple le KRATON® ; les polyphénylènes, tels que les poly(sulfure de phénylènes) et les poly(oxyde de phénylènes) ; les polyimidazoles, tels que les polybenzimidazoles (PBI) ; les polyimides (PI) ; les polyamideimides (PAI) ; les polyanilines ; les polypyrrroles ; les polysulfonamides ; les polypyrazoles, tels que les polybenzopyrazoles ; les polyoxazoles, tels que les polybenzoxazoles ; les polyéthers, tels que les poly(oxyde de tétraméthylène) et les poly(oxyde d'hexaméthylènes) ; les poly(acide (méth)acryliques) ; les polyacrylamides ; les polyvinyles, tels que les poly(esters de vinyle), par exemple les polyvinylacétates, les polyvinylformates, les polyvinylpropionates, les polyvinyllaurates, les

polyvinylpalmitates, les polyvinylstéarates, les
polyvinyltriméthylacétates, les
polyvinylchloroacétates, les
polyvinyltrichloroacétates, les
5 polyvinyltrifluoroacétates, les polyvinylbenzoates, les
polyvinylpivalates, les polyvinylalcools ; les résines
acétales, telles que les polyvinylbutyrales ; les
polyvinylpyridines ; les polyvinylpyrrolidones ; les
polyoléfines, telles que les polyéthylènes, les
10 polypropylènes, les polyisobutylènes ; les poly(oxyde
de styrène) ; les résines fluorées et les
polyperfluorocarbones, tels que les
polytétrafluoroéthylènes (PTFE), par exemple le
TEFLON® ; les poly(fluorure de vinylidènes) (PVDF) ;
15 les polychlorotrifluoroéthylènes (PCTFE) ; les
polyhexafluoropropènes (HFP) ; les perfluoroalcoxydes
(PFA) ; les polyphosphazènes ; les élastomères
siliconés ; les copolymères séquencés comprenant au
moins une séquence constituée par un polymère choisi
20 parmi les polymères ci-dessus.

Lorsque le matériau comprend une troisième phase, à l'intérieur des pores constituées par un agent tensioactif, ce dernier peut être choisi parmi : les sels d'alkyltriméthylammonium, d'alkylphosphates et
25 d'alkylsulfonates ; les acides comme l'acide dibenzoyltartrique, l'acide maléique ou les acides gras à chaîne longue ; les bases comme l'urée ou les amines à chaîne longue ; les phospholipides ; les copolymères doublement hydrophiles dont l'amphiphilie est générée
30 in situ par interaction avec un substrat ; les copolymères multiblocs amphiphiles comportant au moins

un bloc hydrophobe associé à au moins un bloc hydrophile. Parmi ces polymères, on peut citer, par exemple, les Pluronic® à base de PEO(poly(oxyde d'éthylène)) et PPO(poly(oxyde de propylène)) de type
5 $(EO)_n-(PO)_m-(EO)_n$, les copolymères de type $((EO)_n-(PO)_m)_x-NCH_2CH_2N-((EO)_n-(PO)_m)_x$ (Tetronic®), la famille $C_n(EO)_m(OH)$ (C_n =chaîne alkyle et/ou aryle, EO=chaîne oxyde d'éthylène), par exemple Brij®, Triton® ou Igepal®, et la famille $(EO)_m$ -sorbitan- C_n (Tween®).

10 Il est important de noter que le polymère organique de la phase organique ne doit en aucun cas être confondu avec un polymère tensioactif éventuel. Bien que dénommés alors tous deux « polymères », ces composés sont différents aussi bien au niveau de leur
15 structure que de leurs effets. Le polymère de la phase organique est un polymère qualifié de (mécaniquement) « structurant », tandis que l'éventuel polymère tensioactif est qualifié de « texturant ».

L'invention concerne en outre une membrane
20 comprenant le matériau tel que décrit ci-dessus, éventuellement déposé sur un support.

Par membrane, on entend que le matériau se présente sous la forme d'un film ou feuille d'une épaisseur par exemple de 50 nm à quelques millimètres,
25 de préférence de 10 à 500 μm .

L'invention a trait aussi à une électrode comprenant le matériau, tel que décrit ci-dessus.

Les excellentes propriétés du matériau selon l'invention, sous forme d'une membrane et/ou
30 d'électrode le rendent particulièrement adéquat à une

utilisation dans un dispositif électrochimique, par exemple une pile à combustible.

L'invention concerne donc également une pile à combustible comprenant au moins une membrane et/ou 5 une électrode telle que décrite plus haut.

L'invention a également trait à un procédé de préparation d'un matériau hybride organique-inorganique, tel que décrit plus haut, dans lequel on réalise les étapes suivantes :

10 a) - on prépare une solution, dans un solvant, d'un précurseur minéral A destiné à constituer la phase minérale mésoporeuse, et éventuellement on l'hydrolyse et on la laisse mûrir ;

15 b) on prépare une solution dans un solvant, d'un agent tensioactif D structurant, texturant de la phase minérale mésoporeuse ;

c) - on prépare une solution dans un solvant, d'un polymère organique E ;

20 d) - on ajoute, à l'issue des étapes a), b) et c), la solution d'agent texturant D à la solution de polymère organique E et on homogénéise, puis on ajoute sous agitation au mélange des solutions d'agent tensioactif D et de polymère organique E obtenu la solution de précurseur minéral A ; ou bien

25 on ajoute la solution de précurseur A à la solution d'agent tensioactif D et on homogénéise, puis on ajoute sous agitation la solution de polymère organique E ; ou bien

30 on ajoute la solution de précurseur A à la solution de polymère organique E et on homogénéise,

18.

puis on ajoute sous agitation la solution d'agent tensioactif D;

moyennant quoi, on obtient une solution hybride organique-inorganique ;

5 et on laisse éventuellement mûrir la solution hybride organique-inorganique ainsi obtenue ;

e) - on dépose ou on imprègne la solution hybride organique-inorganique sur un support ;

10 f) - on réalise une évaporation des solvants dans des conditions contrôlées de pression, de température et d'humidité ;

g) - on effectue un traitement thermique pour réaliser une consolidation du matériau déposé ou imprégné ;

15 h) - on élimine éventuellement totalement ou partiellement le tensioactif D ;

i) - on sépare ou on élimine éventuellement le support.

Il est à noter que lorsque le matériau 20 préparé est sous la forme, notamment d'une pellicule, ou couche, et qu'il est déposé ou imprégné sur un substrat, par exemple, plan, alors le procédé peut être défini comme un procédé de préparation d'une membrane.

Le procédé selon l'invention présente une 25 suite unique d'étapes spécifiques qui permettent une croissance adéquate par voie « sol-gel » de la phase inorganique (minérale) mésoporeuse éventuellement fonctionnalisée dans la matrice organique polymère. Les conditions du procédé assurent l'obtention d'un 30 matériau, puis d'une membrane homogène et flexible couplée à la construction de la mésoporosité.

Grâce au procédé selon l'invention, la croissance de la phase mésoporeuse dans le milieu polymérique organique structurant est parfaitement maîtrisée, notamment en présence d'un agent tensioactif 5 texturant.

Avantageusement, on ajoute en outre un agent chélatant B à la solution de précurseur minéral A.

Avantageusement, on ajoute en outre un composé C porteur d'une part de fonctions conductrices 10 et/ou hydrophiles et/ou de fonctions précurseurs de fonctions conductrices et/ou hydrophiles ainsi que d'autre part de fonctions susceptibles de se lier à la surfaces des pores du réseau mésoporeux. Avantageusement, le procédé comprend en outre une étape 15 finale de traitement pour libérer ou générer des fonctions conductrices et/ou hydrophiles sur la surface des pores du matériau.

Avantageusement, on laisse mûrir la solution A à une température de 6°C à 300°C, de préférence de 20 20 à 200°C, à une pression de 100 Pa à $5 \cdot 10^6$ Pa, de préférence de 1 000 Pa à $2 \cdot 10^5$ Pa, pendant une durée de quelques minutes à quelques jours, de préférence d'une heure à une semaine.

Avantageusement, on laisse mûrir la solution 25 hybride organique-inorganique obtenue dans l'étape d) à une température de 0°C à 300°C, de préférence de 20°C à 200°C, à une pression de 100 Pa à $5 \cdot 10^6$ Pa, de préférence de 1 000 Pa à $2 \cdot 10^5$ Pa, pendant une durée de quelques minutes à quelques jours, de préférence d'une 30 heure à une semaine.

Avantageusement, les solvants sont évaporés à une température de 0 à 300°C, de préférence de 10°C à 160°C, à une humidité relative (HR) de 0 à 100 %, de préférence de 20 à 95 %. Ces conditions d'évaporation 5 permettent notamment l'obtention d'une membrane homogène et flexible et de la mésoporosité voulue.

Dans l'étape e), le dépôt ou l'imprégnation de la solution hybride organique-inorganique sur un support est réalisé, par exemple, par un procédé choisi 10 parmi le procédé de dépôt par enduction centrifuge dit « spin-coating », le procédé de dépôt par trempage-retrait dit « dip-coating », le procédé de dépôt par enduction laminaire dit « meniscus-coating », le procédé de dépôt par pulvérisation dit « spray-coating », le procédé de dépôt par coulée et le procédé 15 de dépôt par évaporation.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée à titre illustratif et non limitatif, en référence aux dessins 20 joints dans lesquels :

- la figure 1 est un graphique qui représente les diagrammes d'analyse par diffraction des rayons X aux bas angles des échantillons NAFION®-SiO₂ A, B et C préparés dans l'exemple 1. En ordonnées est porté le 25 nombre de coups et en abscisse d (nm).

Les courbes correspondent depuis le haut vers le bas respectivement aux diagrammes pour les échantillons SiO₂/Nafion : 20% ; SiO₂/Nafion : 50% et SiO₂/Nafion : 10%.

30 - les figures 2A à 2D donnent des micrographies réalisées en microscopie électronique à

balayage qui montrent la morphologie d'une coupe des membranes Nafion-SiO₂-A et Nafion-SiO₂-C (exemple 1).

Figures 2A et 2B : membrane SiO₂/Nafion® : 10%/surfactant P123 avec des échelles respectivement de 5 20 βm et 2 βm.

Figures 2C et 2D : membrane SiO₂/Nafion® : 50%/surfactant P123 à des échelles respectivement de 10 βm et 200 nm.

- la figure 3 est un graphique qui représente 10 les diagrammes d'analyse par diffraction des rayons X aux bas angles de l'échantillon NAFION®-SiO₂ A et de ce même échantillon traité chimiquement (exemple 1).

En ordonnées, est porté le nombre de coups, et en abscisse d (nm).

15 Les courbes correspondent depuis le haut vers le bas respectivement aux diagrammes pour l'échantillon SiO₂/Nafion : 10% traité et pour l'échantillon SiO₂/Nafion : 10% non traité.

- les figures 4A et 4B donnent des 20 micrographies réalisées en microscopie électronique à balayage qui représentent la morphologie d'une coupe des membranes PVBu-SiO₂-A (4A) et PVBu-SiO₂-B (4B) (préparées dans l'exemple 2) avec des échelles respectivement de 10 βm et de 20 βm.

25 - la figure 5 est un graphique qui représente l'analyse par diffraction des rayons X aux bas angles de l'échantillon PVBu-SiO₂-B : 50% et de l'échantillon PVBu-SiO₂-A : 10% préparés dans l'exemple 2.

En ordonnée, est porté le nombre de coups et 30 en abscisse d (nm).

Les courbes (diagrammes) correspondent depuis le haut vers le bas aux diagrammes pour les échantillons PVBu-SiO₂-B : 50% ; et PVBu-SiO₂-A : 10%.

5 - les figures 6 A à 6C ont une micrographie réalisée en microscopie électronique à transmission de la membrane PVBu-SiO₂-A qui a un taux de silice de 10%.

Les figures 6A, 6B et 6C ont respectivement des échelles de 2 μ m, 50 nm et 20 nm.

10 - les figures 7A et 7B donnent des microographies réalisées en microscopie électronique à balayage qui montrent la morphologie en coupe des membranes PVBu-SiO-D avec une échelle de 10 μ m (7A) et PVBu-SiO₂-E (7B) avec une échelle de 3 μ m.

15 - la figure 8 est un graphique qui représente les diagrammes d'analyse par diffraction des rayons X aux bas angles des échantillons PVBu-SiO₂-E : -SH ; PVBu-SiO₂-D : -Ph et PVBu-SiO₂-F : -P(O)(OET)₂.

20 En ordonnée est porté le nombre de coups, et en abscisse d (nm). Les coupes correspondent depuis le haut vers le bas aux diagrammes pour les échantillons PVBu-SiO₂-F ; PVBu-SiO₂-D, et PVBu-SiO₂-E (exemple 2).

25 - les figures 9A et 9B donnent des microographies réalisés en microscopie électronique à balayage qui montrent la morphologie en coupe des membranes PVBu-SiO₂-B avec une échelle de 20 μ m (9A) et PVBu-SiO₂-C avec une échelle de 3 μ m (9B).

30 - la figure 10 est un graphique qui représente les diagrammes d'analyse par diffraction des rayons X aux bas angles des échantillons PVBu-SiO₂-B et PVBu-SiO₂-C (exemple 2).

En ordonnée est porté le nombre de coups, et en abscisse d (nm).

Les courbes correspondent depuis le haut vers le bas respectivement aux diagrammes de l'échantillon 5 PVBu-SiO₂-B : CTAB et l'échantillon PVBu-SiO₂-C : Brij®30.

On décrit dans ce qui suit un procédé de préparation selon l'invention d'un matériau hybride organique-inorganique conducteur présentant une phase 10 organique polymérique et une phase minérale mésoporeuse, ainsi qu'éventuellement une troisième phase de tensioactif.

Ce procédé comprend les étapes suivantes :

15 1. Préparation d'une solution sol-gel
polymérique

20 1.a Préparation d'une solution précurseur à
base de composant inorganique A

La synthèse débute par la préparation du précurseur inorganique qui va constituer l'architecture du réseau mésoporeux minéral.

Typiquement, le précurseur A est choisi parmi 25 les sels de métalloïdes, ou de métaux de transition, ou de lanthanides, comme le silicium, le titane, le zirconium, l'hafnium, l'aluminium, le tantale, l'étain, l'euroium, le cérium, le lanthane et le gadolinium, ou les différents alcoxydes métalliques de ces mêmes 30 métaux.

Ce précurseur est dilué en milieu liquide ; le choix du solvant ou du mélange de solvant est choisi en fonction du milieu de miscibilité du polymère utilisé par la suite, typiquement le solvant est choisi 5 parmi les alcools, les éthers et cétones miscibles ou partiellement miscibles à l'eau.

Cette solution est hydrolysée ou non en milieu catalytique acide ou basique) durant une durée déterminée qui peut s'étendre de quelques minutes à 10 plusieurs heures en fonction du choix du précurseur métallique. Notamment dans le cas des précurseurs métalliques à forte réactivité, tels que les précurseurs à base de zirconium ou de titane, un agent chélatant B, comme l'acétylacétone, l'acide acétique ou 15 les phosphonates, peut être introduit pour contrôler l'hydrolyse-condensation du réseau inorganique.

A ce précurseur ou à ce mélange de ces précurseurs métalliques, une quantité molaire C d'un composé organométallique comportant des fonctions 20 hydroxyle ou des fonctions hydrolysables de type alcoxydes, et des fonctions non hydrolysables ou greffées peut être ajoutée en même temps que le(s) composé(s) purement métallique(s) du même type. Ce composé C répond, par exemple, à la formule 25 $R^3_xR^4_yM'OR_{(n-(x+y))}$: où M' représente un élément du groupe IV, par exemple : Si, ou à la formule $ZR^3_xZR^4_yM''OR_{(n-(x+y))}$: où M'' est un métal p, un métal de transition ou un lanthanide tel que Ti, Zr, Ta, Al, Sn, Eu, Ce, La, Gd, où n est le degré de valence du métal, 30 et Z est une fonction complexante de type monodentate, telle qu'une fonction acétate, phosphonate, phosphate,

ou une fonction de type bidentate comme les β -dicétones et leurs dérivés, et les α ou β -hydroxyacides, R³, R⁴, et R sont des substituants organiques de type H, alkyle, aryle. Particulièrement pour R³, ces substituants peuvent comporter des groupements échangeurs de cations : tels que -SO₃M, -PO₃M₂, -COOM, ou -B(OM)₂, dans lesquels M représente H, un cation métallique monovalent, ou N⁺R¹₄, où chaque R¹ représente indépendamment H, alkyle, ou aryle ; ou des précurseurs de groupements échangeurs de cations : SO₂X, COX, ou PO₃X₂, avec X=F, Cl, Br, I ou OR' (R'=alkyle ou aryle) ; ou des groupements échangeurs d'anions : tels que -NR²₃X⁻, où X représente un anion tel que par exemple F, Cl, Br, I, NO₃, SO₄H ou OR, R représente un radical alkyle ou un radical aryle, et où chaque R² représente indépendamment H, alkyle, aryle, pyridinium, imidazolinium, pyrazolium ou sulfonium, on pourra aussi se reporter à la liste donnée plus haut.

20 1.b Préparation de la solution précurseur à base d'agent texturant D

Le choix de l'agent texturant dépend à la fois de la mésostructure souhaitée, par exemple 25 cubique, hexagonale, lamellaire, vésiculaire ou vermiculaire, de la taille des pores et des murs de cette mésostructure, et de sa solubilisation avec les autres composés de la présente invention, à savoir le polymère et le précurseur minéral. On utilisera 30 généralement des agents texturants surfactés, de types ioniques comme les sels d'alkyltriméthylammonium,

d'alkylphosphates et d'alkylsulfonates, ou des acides comme l'acide dibenzoyltartrique, maléique, les acides gras à chaîne longue ou des bases comme l'urée et les amines à chaîne longue, pour construire des édifices 5 mésoporeux dont la taille des pores se limite à quelques nanomètres, par exemple 1,6 à 10nm et la taille des murs à environ 1nm. On peut utiliser aussi des phospholipides, des copolymères doublement hydrophiles dont l'amphiphilie est générée *in situ* par 10 interaction avec un substrat ou des copolymères multiblocs amphiphiles comportant au moins un bloc hydrophobe associé à au moins un bloc hydrophile typiquement comme les Pluronic® à base de PEO (oxyde de polyéthylène) et PPO (oxyde de polypropylène) de type 15 $(EO)_n-(PO)_m-(EO)_n$, les copolymères de type $((EO)_n-(PO)_m)_x-NCH_2CH_2N-(EO)_n-(PO)_m)_x$ (Tetronic®), la famille $C_n(EO)_m(OH)$ (C_n =chaîne alkyle et/ou aryle, EO=chaîne oxyde d'éthylène), par exemple Brij®, Triton®, Tergitol® ou Igepal®, et la famille 20 $(EO)_m$ -sorbitan- C_n (Tween®) pour préparer des phases mésoporeuses de plus grande taille de pores (jusqu'à 50 nm). Ces différents blocs pourront également être de nature acrylique PMAC (poly(acide méthacrylique) ou PAAc (poly(acide acrylique), aromatique PS 25 (Polystyrène), vinylique PQVP (polyvinylpyridine), PVP (polyvinylpyrrolidone), PVEE (polyvinyléther), ou autre PDMS (polysiloxane). Ces différents blocs peuvent être fonctionnalisés par un groupement conducteur de type échangeurs de cations : $-SO_3M$, $-PO_3M_2$, $-COOM$, ou $-B(OM)_2$ 30 ($M=H$, métal cation monovalent, ammonium, ou $N^+R^1_4$ avec $R^1=H$, alkyle, ou aryle) ; ou des précurseurs de

groupements échangeurs de cations : SO_2X , COX , ou PO_3X_2 ($\text{X}=\text{F}$, Cl , Br , I ou OR' ($\text{R}'=\text{alkyle}$ ou aryle)) ; ou échangeurs d'anions : tels que $^+\text{NR}_3^-\text{X}^-$, où X représente un anion comme par exemple F^- , Cl^- , Br^- , I^- , NO_3^- , SO_4^{H} ou 5 OR' , R' étant un radical alkyle ou un radical aryle et où chaque R^2 représente indépendamment H , alkyle, aryle, pyridium, imidazolinium, pyrazolium ou sulfonium, on pourra aussi se reporter à la liste donnée plus haut. Citons par exemple le PSS (acide 10 poly(styrènesulfonique)). L'agent structurant choisi D est dissout ou dilué en milieu hydroalcoolique ou dans un mélange de solvant à base aqueuse compatible avec le milieu de dilution du polymère et du précurseur métallique.

15

1.c Préparation de la solution précurseur à base de polymère organique E

Le polymère organique E choisi pour ses 20 propriétés thermostable, est dilué ou gonflé avec un solvant ou mélange de solvants de type alcools, éthers ou cétones miscibles ou partiellement miscible à l'eau. Typiquement, ce polymère peut être choisi parmi les polymères déjà décrits plus haut.

25

Ces différents polymères peuvent comprendre des groupements échangeurs de cations : $-\text{SO}_3\text{M}$, $-\text{PO}_3\text{M}_2$, $-\text{COOM}$, ou $-\text{B}(\text{OM})_2$, avec $\text{M}=\text{H}$, métal cation monovalent, ou N^+R^1_4 ($\text{R}^1=\text{H}$, alkyle, ou aryle) ; ou des précurseurs : SO_2X , COX , ou PO_3X_2 , avec $\text{X}=\text{F}$, Cl , Br , I ou OR' 30. ($\text{R}'=\text{alkyle}$ ou aryle). Dans un autre modèle, les différents polymères peuvent comprendre des groupements

échangeurs d'anions déjà définis plus haut : à savoir : $\text{-NR}^2\text{X}^-$, où X représente un anion comme par exemple F, Cl, Br, I, NO_3^- , SO_4^2- ou OR (R étant un radical alkyle ou un radical aryle) et chaque R² représente indépendamment H, alkyle, aryle, pyridinium, imidazolinium, pyrazolium ou sulfonium, on pourra aussi se reporter à la liste donnée plus haut.

1.d Préparation de la solution hybride

La solution précurseur à base de tensioactif D est ajoutée à température ambiante à la solution polymère E. Après homogénéisation du milieu, la solution précurseur à base de composante inorganique A comportant une fraction molaire X de C ($0 \leq X \leq 0,4$) est ajouté à température ambiante au milieu réactionnel goutte à goutte. L'agitation à température contrôlée de l'ambiance au reflux est maintenue durant quelques heures. Ce mûrissement de la solution hybride organique-inorganique peut-être prolongé plusieurs jours selon le choix du polymère et du réseau inorganique. La composition de la formulation est

$$[A_{(1-x)}-C_x]-D_y-E_z-(H_2O)_h \quad \text{où} \quad Y=$$

$$\text{mol}(D) / [\text{mol}[A_{(1-x)}-C_x]] + \text{mol}(D) \quad \text{et} \quad 0 \leq Y \leq 0,2 \quad \text{et} \quad \text{où}$$

$$Z=g(E) / [g(MO_2)+g(E)] \quad \text{et} \quad 0 \leq Z \leq 0,9.$$

2. Préparation de la membrane sol-gel polymérique.

La membrane est réalisée par coulée de la
5 solution hybride organique-inorganique et évaporation
sous pression, température et humidité contrôlées
($15^{\circ}\text{C} < T < 80^{\circ}\text{C}$). Les conditions d'évaporation sont très
importantes pour l'organisation du surfactant en milieu
liquide, la formation finale du réseau mésoporeux et
10 l'interpénétration des deux réseaux co-continus. Les
membranes obtenues sont ensuite traitées thermiquement
entre 50°C et 300°C suivant la nature du polymère pour
obtenir la consolidation. Le surfactant présent dans
les mésopores de la membrane peut-être éliminé par une
15 méthode douce comme par exemple un lavage en milieu
hydroalcoolique acide. Une post-réaction pour libérer
ou générer la fonction conductrice liée au réseau
inorganique peut-être réalisée. Typiquement ce type de
post-réaction peut-être :

- 20- une oxydation d'un groupement mercaptan (-SH)
par l'eau oxygénée en acide sulfonique SO_3H ou,
- l'hydrolyse d'une fonction dialkylphosphonate
 $(\text{RO})_2(\text{O})\text{P}-$ par HCl directement ou via la formation d'un
intermédiaire $(\text{Me}_3\text{SiO})_2(\text{O})\text{P}-$ puis hydrolyse par le MeOH
25 pour former un acide phosphonique $-\text{PO}_3\text{H}_2$.

Cette post-réaction peut également
correspondre à un greffage des hydroxyles M-OH de
surface du réseau inorganique de la membrane par un
organoalcoxyde métallique. Dans tous ces cas la
30 membrane est placée en milieu liquide pour permettre

son gonflement et la diffusion des entités moléculaires réactives dans les pores de la membrane.

Afin d'éviter toute réaction parasite au sein de la membrane lors du fonctionnement de la pile, la 5 membrane conductrice de protons est purifiée par différents lavages oxydants, acides (ou basiques) et aqueux qui permettent d'éliminer toutes les entités organiques, organominérales ou inorganiques labiles.

Dans le procédé selon l'invention, la 10 croissance de la phase mésoporeuse dans le milieu polymérique organique structurant est parfaitement maîtrisée en présence d'un agent tensioactif texturant. Cette maîtrise est liée notamment au choix judicieux des solvants, tels que alcools, éthers, cétones, 15 miscibles ou partiellement miscibles à l'eau, des précurseurs et des conditions opératoires détaillées plus haut.

La membrane peut être préparée également sous forme de film autosupporté en utilisant des méthodes de 20 dépôt en voie liquide, à savoir l'enduction centrifuge (spin-coating), le trempage-retrait (dip-coating) ou l'enduction laminaire (meniscus-coating). Ce film formé est ensuite décollé de son support par gonflement dans un solvant tel que l'eau.

25 La technique de pulvérisation dite de « spray-coating » peut être aussi utilisée pour former des aérosols à partir de la solution hybride organique-inorganique et ainsi réaliser l'imprégnation des électrodes afin notamment d'améliorer la compatibilité 30 électrode-membrane lors du montage en pile.

L'invention va maintenant être décrite en référence aux exemples suivants, donnés à titre illustratif et non limitatif.

5 Exemple 1 : Membrane hybride à base de Nafion® et de silice

On prépare une solution à base d'un précurseur organominéral de silice : le tétraéthoxysilane TEOS, d'un tensioactif : un copolymère tribloc de type EO₂₀-PO₇₀-EO₂₀ le Pluronic® P123, dans l'éthanol. On dilue dans l'éthanol également le polymère Nafion® à 20% en solution commercialisé par la société Dupont, puis on mélange les deux solutions. Après homogénéisation et mûrissement de la solution hybride 12 heures, la solution est évaporée à 30°C dans une boîte de Pétri pour former une membrane homogène et flexible de 150 µm.

On peut faire varier le rapport massique de silice/polymère dans cette préparation :

20 Le tableau 1 donne les différentes formulations préparées :

Echantillon	SiO ₂ /polymère (% en masse)	Concentration (% en masse)
NAFION-SiO ₂ -A	10	2,2
NAFION-SiO ₂ -B	20	2,2
NAFION-SiO ₂ -C	50	2,2

Tableau 1

Les membranes formées se présentent sous forme de films auto-supportés flexibles pour les échantillons NAFION-SiO₂-(A, B), alors que le taux de charge à 50% pour NAFION-SiO₂-C augmente considérablement la rigidité.

La figure 1 présente l'analyse par diffraction des RX aux bas angles des échantillons NAFION-SiO₂-A (courbe du bas), NAFION-SiO₂-B (courbe du haut) et NAFION-SiO₂-C (courbe du milieu).

Sur les échantillons NAFION-SiO₂-B et NAFION-SiO₂-C on observe l'organisation relative au Nafion® avec un pic de diffraction centré à 3,8 nm appelé « pic ionomère » et on observe une organisation mésoporeuse caractérisée par un pic à 9 nm. Il est connu que le surfactant utilisé le Pluronic® P123 a la caractéristique de former des micelles dont la taille des pores est proche de 9 nm. L'échantillon NAFION-SiO₂-A présente seulement l'organisation relative au Nafion®. Dans notre cas le taux de silice est trop faible pour induire une méso-organisation observable en diffraction des RX.

Les figures 2A à 2D présentent la morphologie d'une coupe des membranes NAFION-SiO₂-A et NAFION-SiO₂-C analysée par microscopie électronique à balayage.

Les figures 2A et 2B sont des microographies en coupe dans la membrane SiO₂/Nafion : 10%/surfactant (P123) avec des échelles de 20 βm et 2 βm respectivement et les figures 2C et 2D sont des microographies en coupe de la membrane SiO₂/Nafion :

50% / surfactant (Pl23) avec des échelles de 10 nm et 200 nm respectivement.

Ces membranes sont transparentes et très homogènes, le réseau silicate est noyé dans le 5 polymère.

Ces membranes ont subi un traitement thermique à 90°C pendant 8 heures. On a effectué un traitement chimique oxydant et acide sur les membranes pour éliminer le surfactant et activer tous les sites 10 acides.

La figure 3 présente l'analyse par diffraction des RX aux bas angles de l'échantillon NAFION-SiO₂-A (SiO₂/Nafion : 10%) traité chimiquement (courbe du bas) ou non (courbe du haut).

15 Après traitement chimique, le pic de diffraction relatif à une organisation mésoporeuse apparaît à 9 nm, ce qui nous indique que nous avons libéré les pores du réseau silicate en éliminant le surfactant.

20 Nous avons préparé une solution polymère-TEOS sans surfactant selon la préparation citée plus haut avec un taux de silice de 10%. Une membrane NAFION-SiO₂-X est formée de la même manière.

25 Le tableau 2 donne les valeurs de conductivité ionique de ces deux membranes

Echantillon	SiO ₂ /polymère (% en masse)	Conductivité (S.cm ⁻¹)
NAFION-SiO ₂ -A	10	8. 10 ⁻³ S/cm
NAFION-SiO ₂ -X	10	5. 10 ⁻³ S/cm

Tableau 2

On observe une différence intéressante entre les deux membranes avec un résultat de conductivité en faveur de la membrane construite à partir de tensioactif.

Exemple 2 : Membrane hybride à base de polyvinylbutyrate PVBu et de silice

On prépare une solution à base d'un précurseur de silice : le tétraéthoxysilane TEOS, d'un précurseur organosilicié un ORMOSIL®, d'un tensioactif, dans le tétrahydrofurane THF. On réalise une préhydrolyse avec une solution aqueuse d'acide chlorhydrique. On dilue également le polymère PVBu dans le THF, puis on mélange les deux solutions. Après homogénéisation et mûrissement de la solution hybride pendant 12 heures, la solution est évaporée à 30°C dans une boîte de pétri pour former une membrane homogène et flexible de 150 μ m.

On fait varier deux paramètres dans cette préparation :

- 1) le rapport massique de
silice/polymère
- 2) la fonctionnalisation de la silice
par un OR莫斯il® et la nature de l'ORMOSIL®
- 5 3) la nature du tensioactif

Le tableau 3 donne les différentes
formulations préparées :

Echantillon	SiO ₂ /polymère (% en masse)	ORMOSIL® (% en mole dans SiO ₂)	Tensioactif
PVBu-SiO ₂ -A	10	0	CTAB
PVBu-SiO ₂ -B	50	0	CTAB
PVBu-SiO ₂ -C	50	0	Brij® 30
PVBu-SiO ₂ -D	50	(EtO) ₃ Si(CH ₂) ₃ SH (30)	CTAB
PVBu-SiO ₂ -E	50	(EtO) ₃ SiC ₆ H ₄ (30)	CTAB
PVBu-SiO ₂ -F	50	(EtO) ₃ Si(CH ₂) ₃ P(O)(OEt) ₂ (30)	CTAB

10

Tableau 3

Ces différentes formulations donnent dans tous les cas des films auto-supportés et transparents pour les échantillons PVBu-SiO₂-(A, C à E) et moyennement flexibles. Les autres échantillons (B, D, F) procurent des membranes semi-opaques et très rigides.

1) Etude du rapport massique silice/polymère dans la membrane :

La morphologie des membranes PV_{Bu}-SiO₂-A et
5 PV_{Bu}-SiO₂-B a été observée en microscopie électronique
à balayage dont les clichés sont présentés sur les
figures 4A et 4B.

Figure 4A : micrographie en coupe de la
membrane PV_{Bu}-SiO₂-A (échelle 10 μ m)

10 Figure 4B : micrographie en coupe de la
membrane PV_{Bu}-SiO₂-B (échelle 20 μ m).

On observe des inclusions sphériques de
taille plus petite (1-4 μ m) dans l'échantillon PV_{Bu}-
15 SiO₂-A et, de taille polydisperse et inhomogène en
répartition dans l'échantillon PV_{Bu}-SiO₂-B (1-20 μ m)
avec une couche de ségrégation due au fort taux de
silice 50%. Ces particules sphériques et cette couche
correspondent à du silicate.

20 La figure 5 présente les diagrammes de
diffraction au bas angles de ces membranes. La courbe
du bas est le diagramme pour PV_{Bu}-SiO₂-B : 50% et la
courbe du haut est le diagramme pour PV_{Bu}-SiO₂-A : 10%.

25 Ces diagrammes mettent en évidence une
organisation mésoporeuse dans les deux cas avec une
mésostructure de type hexagonale cylindrique dans le
cas du PV_{Bu}-SiO₂-B. La taille des pores est alors
d'environ 4 nm.

Les figures 6A à 6C présentent des
microographies en microscopie électronique à

transmission de la membrane PVBu-SiO₂-A qui correspond à un taux de silice de 10%. Les figures 6A, 6B, 6C sont avec des échelles respectivement de 2 β m, 50 nm et 20 nm.

5 L'agrandissement d'une particule sphérique démontre la présence d'une mésostructure très bien définie au sein de la bille silicate. Ce résultat confirme celui de la diffraction des rayons X, la structure est hexagonale cylindrique avec une distance
10 interplans d'environ 4 nm.

2) Fonctionnalisation de la silice par un ORMOSIL® et la nature de l'ORMOSIL®:

La morphologie des membranes PVBu-SiO₂-D et PVBu-SiO₂-E a été observée en microscopie électronique à balayage dont les clichés sont présentés sur les figures 7A et 7B.

Figure 7A : micrographie en coupe de la membrane PVBu-SiO₂-D (échelle 10 β m).

Figure 7B : micrographie en coupe de la membrane PVBu-SiO₂-E (échelle 3 β m).

On observe des inclusions sphériques de taille plus petite (1 β m) dans les deux échantillons, ces inclusions sont monodispersées et réparties de manière homogène. La fonctionnalisation de la silice gère l'organisation micronique de la membrane en augmentant la compatibilité silice/polymère.

La figure 8 présente les diagrammes de diffraction au bas angles de ces deux membranes comparés à celui de la membrane PVBu-SiO₂-F.

Le diagramme du haut est celui pour la membrane PVBu-SiO₂-F ; le diagramme du milieu est celui pour la membrane PVBu-SiO₂-D : -Ph et le diagramme du bas est celui pour la membrane PVBu-SiO₂-E : 5 -P(O)(OEt)₂.

Ils mettent en évidence une organisation mésoporeuse avec une mésostructure plus ou moins définie. Dans le cas, de l'échantillon PVBu-SiO₂-F dont la membrane est rigide et semi-opaque à l'œil laissant 10 supposer une inhomogénéité dans la distribution du silicate, il semble que deux organisations co-existent.

3) Nature du tensioactif :

La morphologie de la membrane PVBu-SiO₂-C a été observée en microscopie électronique à balayage et 15 est comparée à la PVBu-SiO₂-B. Les clichés sont présentés sur les figures 9A et 9B.

Figure 9A : micrographie en coupe de la membrane PVBu-SiO₂-B (échelle 20 nm).

Figure 9B : micrographie en coupe de la 20 membrane PVBu-SiO₂-C (échelle 3 nm).

On observe des inclusions sphériques de taille plus petite (1 nm) et réparties de manière homogène dans la membrane quand on utilise un surfactant non ionique PVBu-SiO₂-C. L'utilisation de ce 25 type de surfactant gère l'organisation micronique de la membrane en augmentant la compatibilité surfactant/silice/polymère.

La figure 10 présente les diagrammes de diffraction au bas angles de ces deux membranes. Le

diagramme du haut est le diagramme pour la membrane PVBu-SiO₂-B : CTAB et le diagramme du bas est le diagramme pour la membrane PVBu-SiO₂-C : Brij®30.

Ce diffractogramme met en évidence une organisation mésoporeuse avec une mésostructure plus fine dans le cas de PVBu-SiO₂-B. Mais dans ce cas, il apparaît une séparation de phase du silicate vu le caractère ionique en surface.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) G. Alberti and M. Casciola Solid state protonic conductors, present main applications and future prospects, *Solid State Ionics* 2001, 145, 3-16.
- (2) B. Bonnet, D. J. Jones, J. Roziere, L. Tchicaya, G. Alberti, M. Casciola, L. Massinelli, B. Bauer, A. Peraio and E. Ramunni Hybrid organic-inorganic membranes for a medium temperature fuel cell, *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* 2000, 3, 87-92.
- (3) P. Genova-Dimitrova, B. Baradie, D. Foscallo, C. Poinsignon and J. Y. Sanchez Ionomeric membranes for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC): sulfonated polysulfone associated with phosphatoantimonic acid, *Journal of Membrane Science* 2001, 185, 59-71.
- (4) N. Miyake, J. S. Wainright and R. F. Savinell Evaluation of a sol-gel derived Nafion/silica hybrid membrane for proton electrolyte membrane fuel cell applications - I. Proton conductivity and water content, *Journal of the Electrochemical Society* 2001, 148, A898-A904.
- (5) C. Yang, S. Srinivasan, A. S. Arico, P. Creti, V. Baglio and V. Antonucci Composition Nafion/zirconium phosphate membranes for direct methanol fuel cell operation at high temperature, *Electrochemical & Solid-State Letters* 2001, 4, A31-A34.
- (6) J. M. Fenton, H. R. Kunz and J.-C. Lin, Improved membrane electrode assemblies using ionic composite membranes for fuel cells, 2002, WO0223646.

- (7) O. J. Murphy and A. J. Cisar ,Composite membrane suitable for use in electrochemical devices, 2000, WO00063995.
- (8) K. T. Adjemian, S. J. Lee, S. Srinivasan, J. Benziger and A. B. Bocarsly Silicon oxide Nafion composite membranes for proton-exchange membrane fuel cell operation at 80-140 degrees C, *Journal of the Electrochemical Society* 2002, 149, A256-A261.
- (9) B. Baradie, J. P. Dodelet and D. Guay Hybrid Nafion (R)-inorganic membrane with potential applications for polymer electrolyte fuel cells, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 2000, 489, 101-105.
- (10) M. A. Harmer, Q. Sun, A. J. Vega, W. E. Farneth, A. Heidekum and W. F. Hoelderich Nafion resin-silica nanocomposite solid acid catalysts. Microstructure-processing-property correlations, *Green Chemistry* 2000, 2, 7-14.
- (11) D. J. Jones and J. Roziere Recent advances in the functionalisation of polybenzimidazole and polyetherketone for fuel cell applications, *Journal of Membrane Science* 2001, 185, 41-58.
- (12) K. A. Mauritz and J. T. Payne [Perfluorosulfonate ionomer]/silicate hybrid membranes via base-catalyzed in situ sol-gel process for tetraethylorthosilicate, *Journal of Membrane Science* 2000, 168, 39-51.
- (13) S. P. Nunes and R. A. Zoppi Electrochemical impedance studies of hybrids of perfluorosulfonic acid ionomer and silicon oxide by

- sol-gel reaction from solution, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 1998, 445, 39-45.
- (14) E. Peled, T. Duvdevani, A. Melman and A. Aharon ,Fuel Cell with proton conducting membrane, 5 2001, WO 0154216.
- (15) P. Staiti Proton conductive membranes constituted of silicotungstic acid anchored to silica-polybenzimidazole matrices, *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* 2001, 4, 181-186.
- 10 (16) H. T. Wang, B. A. Holmberg, L. M. Huang, Z. B. Wang, A. Mitra, J. M. Norbeck and Y. S. Yan Nafion-bifunctional silica composite proton conductive membranes, *Journal of Materials Chemistry* 2002, 12, 834-837..
- 15 (17) M. Watanabe and P. Stonehart ,Polymer solid-electrolyte composition and electrochemical cell using the composition, 1996, US5523181.
- (18) J. Kerres, G. Schafer and N. Nicoloso, Proton-conducting ceramic/polymer membrane for range up 20 to 300 C, 2002, US02093008.
- (19) J. Roziere, D. Jones, L. Tchicaya Boukary and B. Bauer ,Materiau hybride, utilisation dudit materiau hybride et procede de sa fabrication, 2000, WO 0205370.
- 25 (20) I. Honma ,Hight temperature proton conductive organic-inorganic composite membranes and their manufacture, 2000, JP00090946.
- (21) U. L. Stangar, N. Groselj, B. Orel, A. Schmitz and P. Colomban Proton-conducting sol-gel 30 hybrids containing heteropoly acids, *Solid State Ionics* 2001, 145, 109-118.

- (22) Y. Park and M. Nagai Proton exchange nanocomposite membranes based on 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane, silicotungstic acid and alpha-zirconium phosphate hydrate, *Solid State Ionics* 2001, 145, 149-160.
- (23) F. M. Vichi, M. T. Colomer and M. A. Anderson Nanopore ceramic membranes as novel electrolytes for proton exchange membranes, *Electrochemical & Solid-State Letters* 1999, 2, 313-316.
- (24) M. T. Colomer and M. A. Anderson High porosity silica xerogels prepared by a particulate sol-gel route: pore structure and proton conductivity, *Journal of Non-Crystalline Solids* 2001, 290, 93-104.
- (25) A. Sayari and S. Hamoudi Periodic mesoporous silica-based organic - Inorganic nanocomposite materials, *Chemistry of Materials* 2001, 13, 3151-3168.
- (26) A. Matsuda, Y. Nono, T. Kanzaki, K. Tadanaga, M. Tatsumisago and T. Minami Proton conductivity of acid-impregnated mesoporous silica gels prepared using surfactants as a template, *Solid State Ionics* 2001, 145, 135-140.
- (27) S. Nishiwaki, K. Tadanaga, M. Tatsumisago and T. Minami Preparation and proton conductivity of surfactant-templated mesoporous silica gels impregnated with protonic acids, *Journal of the American Ceramic Society* 2000, 83, 3004-3008.
- (28) A. Matsuda, T. Kanzaki, K. Tadanaga, T. Kogure, M. Tatsumisago and T. Minami Sol-gel derived porous silica gels impregnated with sulfuric acid - Pore structure and proton conductivities at medium

temperatures, *Journal of the Electrochemical Society* 2002, 149, E292-E297.

(29) I. Diaz, C. Marquez-Alvarez, F. Mohino, J. Perez-Pariente and E. Sastre A novel synthesis 5 route of well ordered, sulfur-bearing MCM-41 catalysts involving mixtures of neutral and cationic surfactants, *Microporous & Mesoporous Materials* 2001, 44, 295-302.

(30) D. Margolese, J. A. Melero, S. C. Christiansen, B. F. Chmelka and G. D. Stucky Direct 10 syntheses of ordered SBA-15 mesoporous silica containing sulfonic acid groups, *Chemistry of Materials* 2000, 12, 2448-2459.

(31) M. H. Lim, C. F. Blanford and A. Stein Synthesis of ordered microporous silicates with 15 organosulfur surface groups and their applications as solid acid catalysts, *Chemistry of Materials* 1998, 10, 467-+.

(32) R. J. P. Corriu, L. Datas, Y. Guari, A. Mehdi, C. Reye and C. Thieuleux Ordered SBA-15 20 mesoporous silica containing phosphonic acid groups prepared by a direct synthetic approach, *Chemical Communications* 2001, 763-764.

(33) S. Mikhailenko, D. Desplantier-Giscard, C. Danumah and S. Kaliaguine Solid electrolyte 25 properties of sulfonic acid functionalized mesostructured porous silica, *Microporous & Mesoporous Materials* 2002, 52, 29-37.

(34) GJD. Soler-illia, C. Sanchez, B. Lebeau, J. Patarin. Chemical strategies to design textured 30 materials : From microporous and mesoporous oxides to

nanonetworks and hierarchical structures, *Chemical
Reviews*, 102(11) : 4093-4138, 2002 Nov.

REVENDICATIONS

1. Matériau hybride organique-inorganique comprenant deux phases :
 - une première phase minérale comprenant un réseau mésoporeux structuré à porosité ouverte ; et
 - une deuxième phase organique comprenant un polymère organique, ladite phase organique n'étant essentiellement pas présente à l'intérieur des pores du réseau mésoporeux structuré.
- 10 2. Matériau selon la revendication 1, comprenant en outre une troisième phase, à l'intérieur des pores, constituée par au moins un agent tensioactif.
- 15 3. Matériau selon la revendication 1, dans lequel la phase minérale et la phase organique sont continues et entremêlées.
4. Matériau selon la revendication 1, dans lequel la phase minérale est discontinue et dispersée dans la phase organique qui est continue.
- 20 5. Matériau selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la phase minérale présente des fonctions conductrices et/ou hydrophiles sur les surfaces de ses pores.
- 25 6. Matériau selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la phase organique présente des fonctions conductrices et/ou hydrophiles.
- 30 7. Matériau selon l'une quelconque des revendications 5 à 6, dans lequel la troisième phase constituée par au moins un agent tensioactif présente des fonctions conductrices et/ou hydrophiles.

8. Matériau selon la revendication 5 ou 6, dans lequel lesdites fonctions conductrices sont choisies parmi les groupes échangeurs de cations.

9. Matériau selon la revendication 8, dans 5 lequel lesdits groupes échangeurs de cations sont choisis parmi les groupes suivants : SO_3M ; $-\text{PO}_3\text{M}_2$; $-\text{COOM}$; et $\text{B}(\text{OM})_2$; où M représente l'hydrogène, un cation métallique monovalent, ou $^+\text{NR}^1_4$, où chaque R^1 10 représente indépendamment un hydrogène, un radical alkyle ou un radical aryle.

10. Matériau selon l'une quelconque des revendications 5 à 7, dans lequel lesdites fonctions conductrices sont choisies parmi les groupes échangeurs d'anions.

15 11. Matériau selon la revendication 10, dans lequel lesdits groupes échangeurs d'anions sont choisis parmi les groupes suivants : pyridyle, imidazolyde, pyrazolyde ; triazolyde ; les radicaux de formule $^+\text{NR}^2_3\text{X}^-$, où X représente un anion comme par 20 exemple F, Cl, Br, I, NO_3 , SO_4H ou OR, R étant un radical alkyle ou un radical aryle, et où chaque R^2 représente indépendamment un hydrogène, un radical alkyle, ou un radical aryle ; et les radicaux basiques 25 aromatiques ou non aromatiques contenant au moins un radical choisi parmi les radicaux imidazole, vinylimidazole, pyrazole, oxazole, carbazole, indole, isoindole, dihydrooxazole, isooxazole, thiazole, benzothiazole, isothiazole, benzoimidazole, indazole, 4,5-dihydropyrazole, 1,2,3-oxadiazole, furazane, 30 1,2,3-thiadiazole, 1,2,4-thiadiazole,

1,2,3-benzotriazole, 1,2,4-triazole, tetrazole, pyrrole, aniline, pyrrolidine, et pyrazole.

12. Matériau selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la phase minérale est constituée par au moins un oxyde choisi parmi les oxydes de métaux, les oxydes de métalloïdes et les oxydes mixtes de ceux-ci.

10 13. Matériau selon la revendication 12, dans lequel ledit oxyde est choisi parmi les oxydes de silicium, titane, zirconium, hafnium, aluminium, tantale, étain, terres rares telles que europium, cérium, lanthane et gadolinium, et les oxydes mixtes de ceux-ci.

15 14. Matériau selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le réseau mésoporeux présente une structure organisée avec un motif de répétition.

20 15. Matériau selon la revendication 14, dans lequel le réseau mésoporeux présente une structure cubique, hexagonale, lamellaire, vermiculaire, vésiculaire ou bicontinue.

16. Matériau selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la taille des pores est de 1 à 100 nm, de préférence de 1 à 50 nm.

25 17. Matériau selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le polymère organique est un polymère thermostable.

30 18. Matériau selon la revendication 17, dans lequel le polymère organique est choisi parmi les polyéthercéttones (PEK, PEEK, PEEKK) ; les polysulfones (PSU) ; les polyéthersulfones ; les

polyphényléthersulfones (PPSU) ; les copolymères styrène/éthylène (SES), styrène/butadiène (SBS), styrène/isoprène (SIS) ; les polyphénylènes, tels que les poly(sulfure de phényle) et les poly(oxyde de phényle) ; les polyimidazoles, tels que les polybenzimidazoles (PBI) ; les polyimides (PI) ; les polyamideimides (PAI) ; les polyanilines ; les polypyrrroles ; les polysulfonamides ; les polypyrazoles, tels que les polybenzopyrazoles ; les 5 polyoxazoles, tels que les polybenzoxazoles ; les polyéthers, tels que les poly(oxyde de tétraméthylène) et les poly(oxyde d'hexaméthylène) ; les poly(acide (méth)acryliques) ; les polyacrylamides ; les polyvinyles, tels que les poly(esters de vinyle), par 10 exemple les polyvinylacétates, les polyvinylformates, les polyvinylpropionates, les polyvinyllaurates, les polyvinylpalmitates, les polyvinylstéarates, les polyvinyltriméthylacétate, les polyvinylchloroacétates, les polyvinyl trichloroacétates, les polyvinyl 15 trifluoroacétates, les polyvinylbenzoates les polyvinylpivalates, les polyvinylalcools ; les résines acétales, telles que les polyvinylbutyrales ; les polyvinylpyridines ; les polyvinylpyrrolidones ; les polyoléfines, telles que les polyéthylènes, les 20 polypropylènes, les polyisobutylènes ; les poly(oxyde de styrène) ; les résines fluorées et les polyperfluorocarbones, tels que les polytétrafluoroéthylènes (PTFE) ; les poly(fluorure de vinylidènes) (PVDF) ; les polychlorotrifluoroéthylènes 25 (PCTFE) ; les polyhexafluoropropènes (HFP) ; les perfluoroalcoxydes (PFA) ; les polyphosphazènes ; les 30

élastomères siliconés ; les copolymères séquencés comprenant au moins une séquence constituée par un polymère choisi parmi les polymères ci-dessus.

19. Matériau selon l'une quelconque des 5 revendications 2 à 18, dans lequel l'agent tensioactif est choisi parmi : les surfactants, tels que les sels d'alkyltriméthylammonium, d'alkylphosphates et d'alkylsulfonates ; les acides comme l'acide dibenzoyltartrique, l'acide maléique, les acides gras à 10 chaîne longue ; les bases comme l'urée et les amines à chaîne longue ; les phospholipides ; les copolymères doublement hydrophiles dont l'amphiphilie est générée in situ par interaction avec un substrat ; les copolymères multiblocs amphiphiles comportant au moins 15 un bloc hydrophobe associé à au moins un bloc hydrophile.

20. Membrane comprenant le matériau selon l'une quelconque des revendications précédentes, éventuellement déposé sur un support.

21. Electrode comprenant le matériau selon l'une quelconque des revendications 1 à 19.

22. Pile à combustible comprenant au moins une membrane selon la revendication 20 et/ou une électrode selon la revendication 21.

23. Procédé de préparation du matériau selon l'une quelconque des revendications 1 à 19, dans lequel on réalise les étapes suivantes :

a) - on prépare une solution, dans un solvant, d'un précurseur minéral A destiné à constituer 30 la phase minérale mésoporeuse, et éventuellement on l'hydrolyse et on la laisse mûrir ;

- b) on prépare une solution dans un solvant, d'un agent tensioactif D, texturant de la phase minérale mésoporeuse ;
- 5 c) - on prépare une solution dans un solvant, d'un polymère organique E ;
- d) - on ajoute, à l'issue des étapes a), b) et c), la solution d'agent texturant D à la solution de polymère organique E et on homogénéise, puis on ajoute sous agitation au mélange des solutions d'agent 10 tensioactif D et de polymère organique E obtenu la solution de précurseur minéral A ; ou bien
- on ajoute la solution de précurseur A à la solution d'agent tensioactif D et on homogénéise, puis on ajoute sous agitation la solution de polymère 15 organique E ; ou bien
- on ajoute la solution de précurseur A à la solution de polymère organique E et on homogénéise, puis on ajoute sous agitation la solution d'agent tensioactif D ;
- 20 moyennant quoi, on obtient une solution hybride organique-inorganique ;
- et on laisse éventuellement mûrir la solution hybride organique-inorganique ainsi obtenue ;
- e) - on dépose ou on imprègne la solution 25 hybride organique-inorganique sur un support ;
- f) - on réalise une évaporation des solvants dans des conditions contrôlées de pression, de température et d'humidité ;
- g) - on effectue un traitement thermique 30 pour réaliser une consolidation du matériau déposé ou imprégné ;

h) - on élimine éventuellement, totalement ou partiellement, le tensioactif D ;

i) - on sépare ou on élimine éventuellement le support.

5 24. Procédé selon la revendication 23, dans lequel on ajoute en outre un agent chélatant B à la solution de précurseur minéral A.

10 25. Procédé selon l'une quelconque des revendications 23 à 24, dans lequel on ajoute en outre à la solution de précurseur minéral A, un composé C, porteur, d'une part, de fonctions conductrices et/ou hydrophiles et/ou de fonctions précurseurs de fonctions conductrices et/ou hydrophiles, et, d'autre part, de fonctions susceptibles de se lier à la surface des 15 pores du réseau mésoporeux.

20 26. Procédé selon l'une quelconque des revendications 23 à 25, dans lequel le procédé comprend en outre une étape finale de traitement pour libérer ou générer des fonctions conductrices et/ou hydrophiles sur la surface des pores du matériau.

25 27. Procédé selon l'une quelconque des revendications 23 à 26, dans lequel on laisse mûrir la solution A à une température de 0°C à 300°C, de préférence de 20°C à 200°C ; à une pression de 100 Pa à 5.10⁶ Pa, de préférence de 1 000 Pa à 2.10⁵ Pa ; pendant une durée de quelques minutes à quelques jours, de préférence d'une heure à une semaine.

30 28. Procédé selon l'une quelconque des revendications 23 à 27, dans lequel on laisse mûrir la solution hybride organique-inorganique obtenue dans l'étape d) à une température de 0 à 300°C, de

préférence de 20°C à 200°C ; à une pression de 100 Pa à 5.10⁶ Pa, de préférence de 1 000 Pa à 2.10⁵ Pa ; pendant une durée de quelques minutes à quelques jours, de préférence d'une heure à une semaine.

5 29. Procédé selon l'une quelconque des revendications 23 à 28, dans lequel on évapore les solvants à une température de 0 à 300°C, de préférence de 10°C à 160°C ; à une humidité relative (HR) de 0 à 100 %, de préférence de 20 à 95 %.

10 30. Procédé selon l'une quelconque des revendications 23 à 29, dans lequel, dans l'étape e), le dépôt ou l'imprégnation de la solution hybride organique-inorganique sur un support est réalisé par un procédé choisi parmi le procédé de dépôt par induction 15 centrifuge dit « spin-coating », le procédé de dépôt par trempage-retrait dit « dip-coating », le procédé de dépôt par induction laminaire dit « meniscus-coating », le procédé de dépôt par pulvérisation dit « spray-coating », le procédé de dépôt par coulée et le procédé 20 de dépôt par évaporation.

1/5

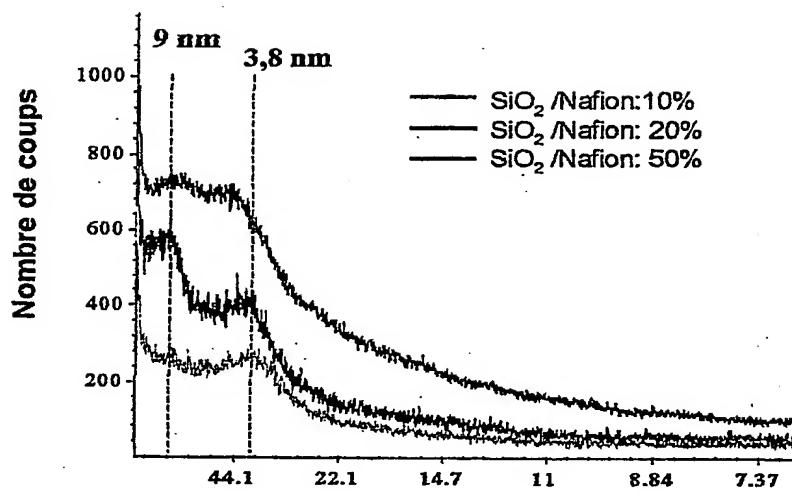


FIG. 1

FIG. 2A

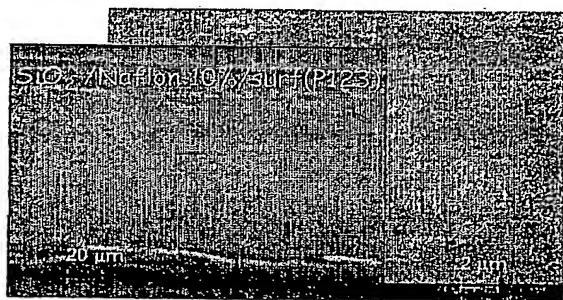


FIG. 2B

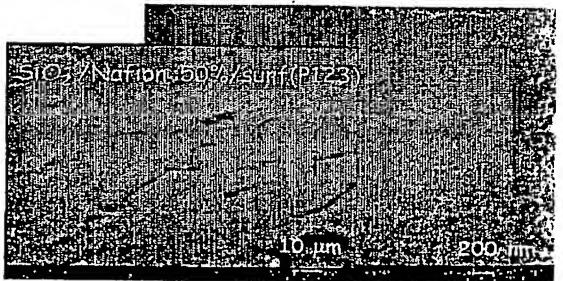


FIG. 2C

FIG. 2D

2/5

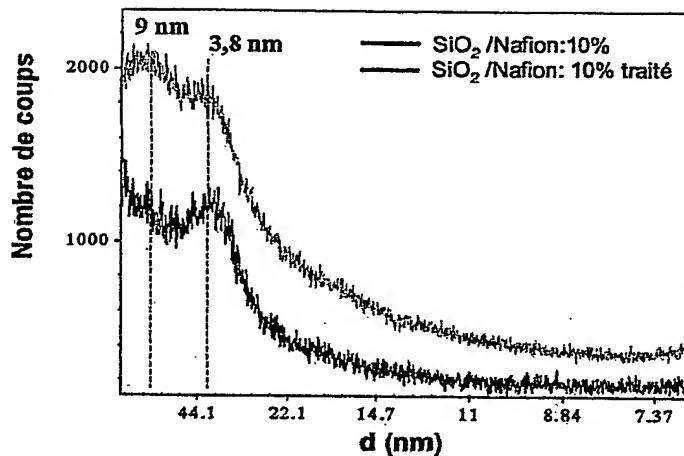


FIG. 3

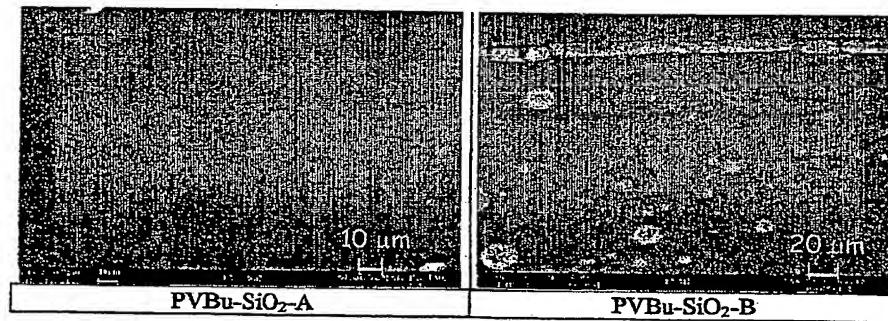


FIG. 4A

FIG. 4B

3/5

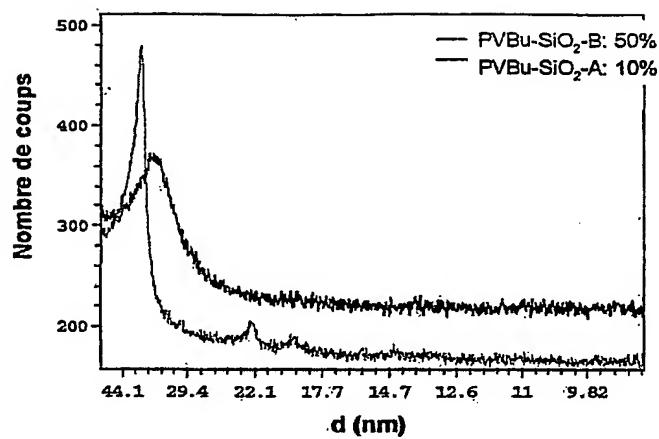


FIG. 5

FIG. 6A

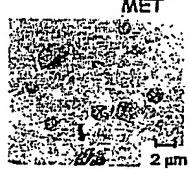


FIG. 6C

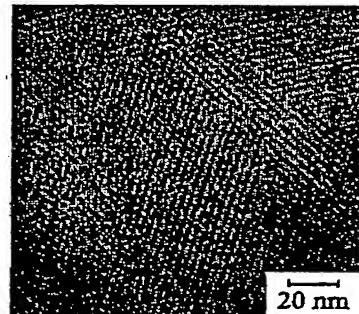


FIG. 6B



4/5

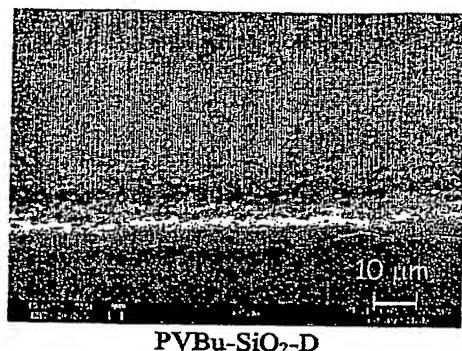


FIG. 7A

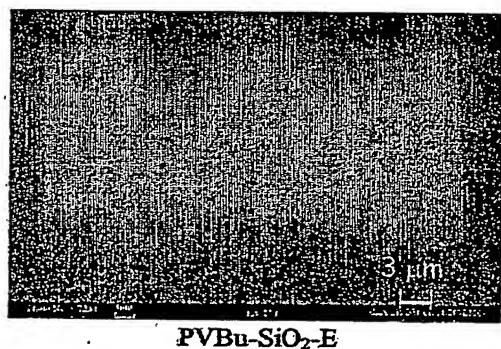


FIG. 7B

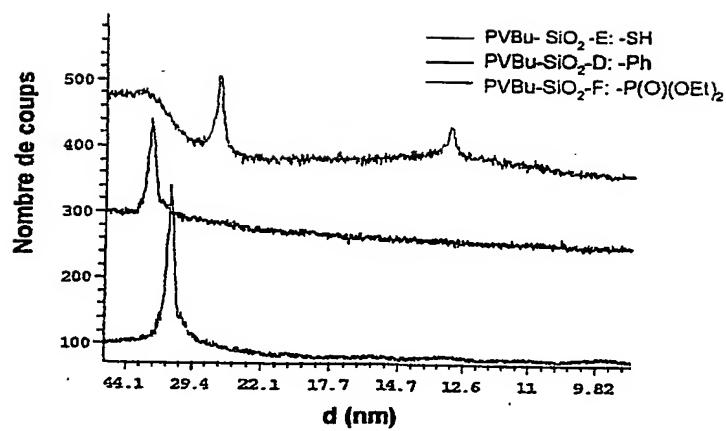


FIG. 8

5/5

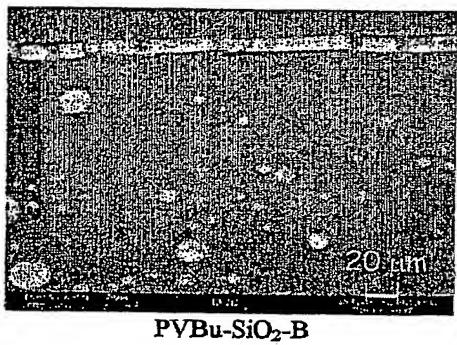
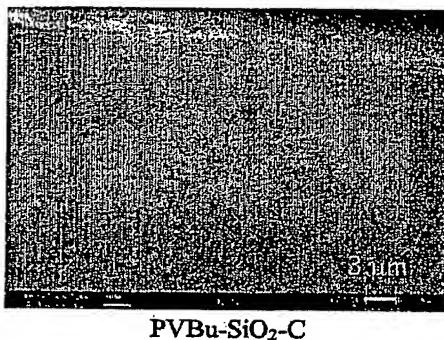
PVBu-SiO₂-BPVBu-SiO₂-C

FIG. 9A

FIG. 9B

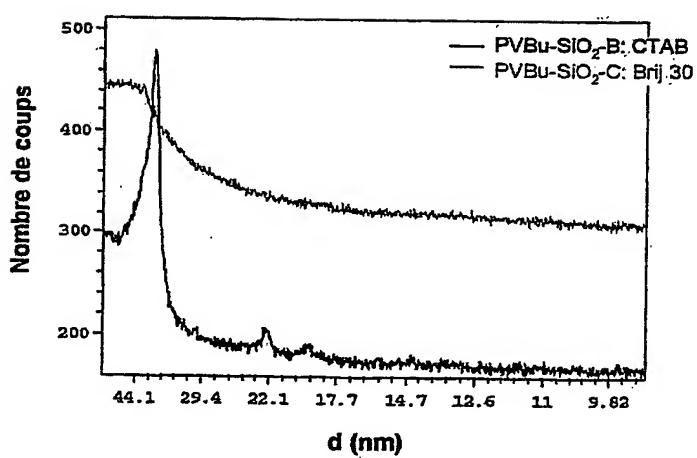


FIG. 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

PCT/FR2004/050025

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 IPC 7 C08J5/22 C08L101/12 H01M8/10

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 C08J C08L H01M

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 02/05370 A (BAUER BERND ;FUMA TECH GMBH (DE); JONES DEBORAH (FR); ROZIERE JACQ) 17 January 2002 (2002-01-17) cited in the application page 2, line 20 - page 24, line 17; claims; figures	1-30
X	WO 92/06775 A (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE) 30 April 1992 (1992-04-30) page 3, line 15 - page 8, line 21; claims; examples	1-20
X	WO 02/41043 A (UNIV CALIFORNIA) 23 May 2002 (2002-05-23) page 7, paragraph 17 - page 31, paragraph 85; claims; figures	1-20, 23-30

 Further documents are listed in the continuation of box C. Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *&* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

24 May 2004

Date of mailing of the international search report

29/06/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Otegui Rebollo, J

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

PCT/FR2004/050025

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 99/12994 A (MAX PLANCK GESELLSCHAFT ; TEMPLIN MARKUS (DE); WIESNER ULRICH BERND) 18 March 1999 (1999-03-18) page 1, lines 7-21 page 3, line 1 - page 20, line 9; claims; figures; examples	1-20, 23-30
X	DE 42 25 952 A (UNIV SCHILLER JENA) 10 February 1994 (1994-02-10) page 2, line 3 - page 3, line 33; claims; examples	1, 3
X	LACONTI A B ET AL: "Proton exchange membrane electrochemical capacitors and fuel cells for pulse power applications" PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL POWER SOURCES SYMPOSIUM. CHERRY HILL, NJ., JUNE 22 - 25, 1992, NEW YORK, IEEE, US, vol. SYMP. 35, 22 June 1992 (1992-06-22), pages 298-301, XP010103434 ISBN: 0-7803-0552-3 page 298, left-hand column, line 1 - page 301, right-hand column, paragraph 1; figures	1, 20-22
X	US 6 270 846 B1 (BRINKER C JEFFREY ET AL) 7 August 2001 (2001-08-07) column 2, line 19 - column 4, line 11 column 5, line 45 - column 6, line 8; claims	1-3, 5-20, 23-30
X	WO 00/77080 A (KERRES JOCHEN ; NICOLOSO NORBERT (DE); UNIV STUTTGART INST FUER PHY) 21 December 2000 (2000-12-21) page 1, paragraph 1 page 2, line 2 - page 6, line 3; claims	1, 4, 20-22
X	WO 01/84657 A (KERRES JOCHEN ; UNIV STUTTGART (DE)) 8 November 2001 (2001-11-08) page 1, lines 8-21 page 3, line 19 - page 7, line 7; claims; figures	1, 4, 20-22
X	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 2003, no. 05, 12 May 2003 (2003-05-12) & JP 2003 016834 A (KAGAWA INDUSTRY SUPPORT FOUNDATION; KONDO KAGAKU KOGYO KK), 17 January 2003 (2003-01-17) abstract	1, 20-22

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

PCT/FR2004/050025

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)	Publication date
WO 0205370	A	17-01-2002		FR 2811323 A1 AU 8580401 A CA 2415355 A1 WO 0205370 A1 EP 1301958 A1 US 2004053060 A1	11-01-2002 21-01-2002 06-01-2003 17-01-2002 16-04-2003 18-03-2004
WO 9206775	A	30-04-1992		FR 2668077 A1 DE 69112076 D1 DE 69112076 T2 DK 555269 T3 EP 0555269 A1 ES 2077249 T3 WO 9206775 A1 JP 6502116 T US 5342521 A	24-04-1992 14-09-1995 11-04-1996 08-01-1996 18-08-1993 16-11-1995 30-04-1992 10-03-1994 30-08-1994
WO 0241043	A	23-05-2002		AU 2007702 A US 2002065366 A1 WO 0241043 A2	27-05-2002 30-05-2002 23-05-2002
WO 9912994	A	18-03-1999		DE 19738913 A1 WO 9912994 A1 US 6592991 B1	11-03-1999 18-03-1999 15-07-2003
DE 4225952	A	10-02-1994		DE 4225952 A1	10-02-1994
US 6270846	B1	07-08-2001		NONE	
WO 0077080	A	21-12-2000		DE 19919988 A1 CA 2372693 A1 WO 0077080 A1 EP 1181327 A1 US 2002093008 A1	02-11-2000 21-12-2000 21-12-2000 27-02-2002 18-07-2002
WO 0184657	A	08-11-2001		DE 10021106 A1 AU 6007001 A BR 0110561 A CA 2408381 A1 CN 1427864 T WO 0184657 A2 DE 10191702 D2 EP 1282657 A2 JP 2003532756 T	08-11-2001 12-11-2001 30-12-2003 01-11-2002 02-07-2003 08-11-2001 22-05-2003 12-02-2003 05-11-2003
JP 2003016834	A	17-01-2003		NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

PCT/FR2004/050025

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 C08J5/22 C08L101/12 H01M8/10

Selon la classification Internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 C08J C08L H01M

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	WO 02/05370 A (BAUER BERND ;FUMA TECH GMBH (DE); JONES DEBORAH (FR); ROZIERE JACQ) 17 janvier 2002 (2002-01-17) cité dans la demande page 2, ligne 20 - page 24, ligne 17; revendications; figures	1-30
X	WO 92/06775 A (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE) 30 avril 1992 (1992-04-30) page 3, ligne 15 - page 8, ligne 21; revendications; exemples	1-20
X	WO 02/41043 A (UNIV CALIFORNIA) 23 mai 2002 (2002-05-23) page 7, alinéa 17 - page 31, alinéa 85; revendications; figures	1-20, 23-30
		-/-

Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant éclairer un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- *T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- *X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- *Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- *&* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

24 mai 2004

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

29/06/2004

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Otegui Rebollo, J

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

PCT/FR2004/050025

C(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	WO 99/12994 A (MAX PLANCK GESELLSCHAFT ; TEMPLIN MARKUS (DE); WIESNER ULRICH BERND) 18 mars 1999 (1999-03-18) page 1, ligne 7-21 page 3, ligne 1 - page 20, ligne 9; revendications; figures; exemples	1-20, 23-30
X	DE 42 25 952 A (UNIV SCHILLER JENA) 10 février 1994 (1994-02-10) page 2, ligne 3 - page 3, ligne 33; revendications; exemples	1,3
X	LACONI A B ET AL: "Proton exchange membrane electrochemical capacitors and fuel cells for pulse power applications" PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL POWER SOURCES SYMPOSIUM. CHERRY HILL, NJ., JUNE 22 - 25, 1992, NEW YORK, IEEE, US, vol. SYMP. 35, 22 juin 1992 (1992-06-22), pages 298-301, XP010103434 ISBN: 0-7803-0552-3 page 298, colonne de gauche, ligne 1 - page 301, colonne de droite, alinéa 1; figures	1,20-22
X	US 6 270 846 B1 (BRINKER C JEFFREY ET AL) 7 août 2001 (2001-08-07) colonne 2, ligne 19 - colonne 4, ligne 11 colonne 5, ligne 45 - colonne 6, ligne 8; revendications	1-3, 5-20, 23-30
X	WO 00/77080 A (KERRES JOCHEN ; NICOLOSO NORBERT (DE); UNIV STUTTGART INST FUER PHY) 21 décembre 2000 (2000-12-21) page 1, alinéa 1 page 2, ligne 2 - page 6, ligne 3; revendications	1,4, 20-22
X	WO 01/84657 A (KERRES JOCHEN ; UNIV STUTTGART (DE)) 8 novembre 2001 (2001-11-08) page 1, ligne 8-21 page 3, ligne 19 - page 7, ligne 7; revendications; figures	1,4, 20-22
X	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 2003, no. 05, 12 mai 2003 (2003-05-12) & JP 2003 016834 A (KAGAWA INDUSTRY SUPPORT FOUNDATION; KONDO KAGAKU KOGYO KK), 17 janvier 2003 (2003-01-17) abrégé	1,20-22

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements

membres de familles de brevets

PCT/FR2004/050025

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)		Date de publication
WO 0205370	A	17-01-2002	FR 2811323 A1 AU 8580401 A CA 2415355 A1 WO 0205370 A1 EP 1301958 A1 US 2004053060 A1		11-01-2002 21-01-2002 06-01-2003 17-01-2002 16-04-2003 18-03-2004
WO 9206775	A	30-04-1992	FR 2668077 A1 DE 69112076 D1 DE 69112076 T2 DK 555269 T3 EP 0555269 A1 ES 2077249 T3 WO 9206775 A1 JP 6502116 T US 5342521 A		24-04-1992 14-09-1995 11-04-1996 08-01-1996 18-08-1993 16-11-1995 30-04-1992 10-03-1994 30-08-1994
WO 0241043	A	23-05-2002	AU 2007702 A US 2002065366 A1 WO 0241043 A2		27-05-2002 30-05-2002 23-05-2002
WO 9912994	A	18-03-1999	DE 19738913 A1 WO 9912994 A1 US 6592991 B1		11-03-1999 18-03-1999 15-07-2003
DE 4225952	A	10-02-1994	DE 4225952 A1		10-02-1994
US 6270846	B1	07-08-2001	AUCUN		
WO 0077080	A	21-12-2000	DE 19919988 A1 CA 2372693 A1 WO 0077080 A1 EP 1181327 A1 US 2002093008 A1		02-11-2000 21-12-2000 21-12-2000 27-02-2002 18-07-2002
WO 0184657	A	08-11-2001	DE 10021106 A1 AU 6007001 A BR 0110561 A CA 2408381 A1 CN 1427864 T WO 0184657 A2 DE 10191702 D2 EP 1282657 A2 JP 2003532756 T		08-11-2001 12-11-2001 30-12-2003 01-11-2002 02-07-2003 08-11-2001 22-05-2003 12-02-2003 05-11-2003
JP 2003016834	A	17-01-2003	AUCUN		